

径流过程水分滞留时间研究进展

杨娜^{1,2}, 刘九夫¹, 关铁生¹, 杨勤丽³, 王国庆¹

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 3. 电子科技大学 资源与环境学院, 四川 成都 611731)

摘要: 径流过程水分滞留时间可以揭示有关水的储存、水流路径和水分来源的信息,用于表征和比较不同的水文系统,并且广泛地用来描述流域功能。在前人对径流过程水分滞留时间研究的基础上,系统地总结了地形、土壤覆盖和气候等因素对流域水分滞留时间的影响,分析了同位素和水化学示踪剂在滞留时间评估中的应用,综述了估算水分滞留时间的集总参数模型的研究进展。水文示踪和集总参数模型是研究水分滞留时间的有效手段,强化流域水文循环全要素监测,系统研究关键带径流组分滞留时间是未来深入揭示流域水文过程响应机制的重要内容和研究方向。

关键词: 径流过程; 水分滞留时间; 水文示踪; 集总参数模型

中图分类号:TV121; P33

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)03-0024-06

Research progress on water residence time in runoff process

YANG Na^{1,2}, LIU Jiufu¹, GUAN Tiesheng¹, YANG Qinli³, WANG Guoqing¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology - water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Water Resources & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Water residence time can reveal information of water storage, flow paths and water sources. It could be used to characterize and compare different hydrological systems, and has been widely applied to describe catchment functions. Based on the previous studies on water residence time in runoff processes, this paper systematically reviewed the progress on effects of topography, soil cover and climate on water residence time in catchments, analyzed the applications of isotopic and hydrochemical tracers in the evaluation of residence time, and reviewed the research on lumped parameter models in estimating water residence time. Hydrological tracing and lumped parameter models are effective approaches to estimate water residence time. To strengthen the monitoring of catchment hydrological cycle and systematically study the residence time of runoff components in key zones is an important content and research direction to reveal the response mechanism of hydrological process in the future.

Key words: runoff process; water residence time; hydrological tracing; lumped parameter model

1 研究背景

降雨径流过程中水分在关键带的滞留时间可以揭示水的储存、流路和来源等信息,同时也具体描述了水文系统如何滞留和释放水分与溶质的重要特征,关键带水分滞留时间对地球化学过程、生物循环

过程以及污染物输移转化过程均具有重要影响^[1-2]。水分滞留时间越长,表明水在滞留介质以及地下储存时间越长,意味着降雨通过流域产流、河网汇流以及生物地球化学反应的发生时间会更长^[2]。近年来,对水分滞留时间的研究主要借助于同位素示踪^[3-5]和集总参数模型^[6-8]相结合的方法

收稿日期:2019-01-11; 修回日期:2019-02-22

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41830863、51779146); 国家“十三五”重点研发计划“全球变化及应对”重点专项课题(2016YFA0601501); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金项目(2017490211); 国家自然科学基金项目(91647203、51609145); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(Y517009)

作者简介:杨娜(1989-),女,河北石家庄人,博士研究生,主要从事水文学及水资源研究。

通讯作者:王国庆(1971-),男,山东成武人,博士,教授级高工,从事气候变化和水资源评价等方面的研究。

法,通过估算平均水分滞留时间及滞留时间分布来进一步了解水文径流过程。因此,量化水分滞留时间及其分布是研究流域产汇流过程、揭示地球关键带水文生物化学系统结构特征的重要基础工作,同时,还可以为深入研究流域系统对人类活动输入的响应以及土地利用变化所带来的敏感性提供必要的水文信息^[9]。本文将从水分滞留时间及其影响因素、同位素和水化学示踪剂在滞留时间评估中的应用以及估算水分滞留时间的集总参数模型3方面进行综述,并对径流过程水分滞留时间研究进行展望,为进一步揭示流域水文过程响应机制提供新见解。

2 水分滞留时间及其影响因素

水分滞留时间是描述水文功能以及表征和比较不同水文系统的常用指标^[1],在径流过程研究中,常将水分滞留时间概念化为流域水文的综合时间响应^[10]。目前,对水分滞留时间的研究主要集中在径流平均滞留时间和滞留时间的分布函数特征两个方面。流域内部结构特征对水分滞留时间有直接影响,因此,可以从滞留时间来研究流域水分来源、流动路径以及水体贮存等性质^[11]。影响水分滞留时间的因素主要包括地形^[12]、土壤特性^[13]和气候^[14]等。

流域地形是一个最为主要的水文驱动因素,同时,不同类型土壤的空间分布对地表和土壤径流路径之间的水分运移分配会产生重大影响^[15]。限于观测水平,目前对小尺度试验流域内水分滞留时间的研究相对较多,对中大尺度流域的平均水分滞留时间研究相对较少^[16];已有的研究表明,水分滞留时间对小尺度流域空间异质性变化响应敏感,同时,流域内景观特征对平均滞留时间的影响显著^[17]。流域面积大小与基流滞留时间无明显的定量关系,但中尺度流域总径流平均滞留时间与流域面积存在较好的正相关关系;同时,发现地形结构与滞留时间的关系更为密切^[18],径流路径长度和梯度与滞留时间分布的相关系数可以高达0.9以上^[12]。

Sayama等^[19]研究认为在确定山坡尺度的水分平均滞留时间方面土壤被覆比地形更为重要。此外,反映土壤渗透性和水文连通性的流域特征指标与平均滞留时间密切相关^[20];对于地下水而言,流域地质情况是决定平均滞留时间的关键因素^[21]。

气候,如降水量也是影响平均滞留时间年际变化和空间变异的重要因素,Tapia等^[22]采用长期示踪剂数据的分析结果表明夏季降雨量对以融雪径流为主的流域的水分滞留时间分布的非稳定性以及平

均滞留时间的年际变化幅度具有较大的影响。

3 同位素和水化学示踪剂在滞留时间评估中的应用

水文示踪实验是研究水分滞留时间的常用方法^[23],环境示踪剂包括了降雨过程中的天然示踪剂和人工示踪剂两个方面,具体包括水化学示踪剂和同位素示踪剂两种类型。其中,具有稳定季节性变化特征的同位素可用于估计水文系统中的组成部分(例如地表水、土壤水或深层地下水)的滞留时间。当水文系统中示踪剂与水分运移一致时,示踪剂的滞留时间表示了水分的滞留时间^[11]。

稳定同位素氧(¹⁸O)和氢(D)以及一些水化学组分(如Cl⁻)在自然界中容易采集或分析,因此,它们是评估径流过程水体滞留时间的首选要素^[24]。这些示踪剂在降水、土壤水、地下水和河流中的运移特征为流域系统中水分储存、径流组分以及径流产生提供了重要的依据。同位素方法于20世纪60年代开始应用于流域水文过程研究,应用该方法在小尺度流域地表水和地下水相互作用等方面取得了较大进展;随着实验手段和数值模拟技术的快速发展,流域径流过程中水体滞留时间的估算也得到了蓬勃发展^[11]。研究表明,环境同位素¹⁸O或D比较适合追踪小尺度流域内水分的来源和年龄,而³H更适合于研究年龄较老的水分运移规律(15~40 a之间)^[25]。一些学者利用长期同位素数据和在水文数据,通过建立径流过程中同位素的输入-输出响应关系,进而确定水分滞留时间分布和平均滞留时间^[26]。近些年,短历时降雨径流过程的水分滞留时间也得到了较为广泛的关注,Lyon等^[27]根据2006年夏季连续降雨径流过程中同位素(¹⁸O)结果估计了水分滞留时间分布,同时进行了径流分割。短历时降雨径流事件中同位素的滞留时间分布具有时不变特性,因此,¹⁸O是描述流域短期水文过程响应的良好指标。此外,一些稀有气体(如³He^[28]、⁸⁵Kr^[29]和²²²Rn^[30])以及其他天然和人工示踪剂(如CF₂、Cs^[31]、⁷Be^[32]、³⁵S^[33]、SF₆^[34]、AGA^[17])也可用来测定不同水体在关键带中的滞留时间。CFC、³H-³He、SF₆和⁸⁵Kr^[35]等溶解气体更多地作为环境示踪剂估计饱和带水分的滞留时间研究。由于大气和包气带之间存在气体交换,因此这些示踪剂不适用于浅层土壤或河流水分的滞留时间研究,通过非饱和带输送到地下水水位的气体示踪剂也会出现延时性现象^[35]。

近年来,水化学示踪剂逐渐作为同位素的补充示踪数据,用于追踪水分储存与交换过程研究,并用于估算水分滞留时间分布^[36],其中应用较多的水化学示踪剂为 Cl^- 。 Cl^- 分布广泛,可以作为天然示踪剂用于研究人烟稀少区域水分的运移及其滞留时间^[37]。因为 Cl^- 在水文过程输入和输出之间存在阻尼动力现象,这一现象反映了降水中 Cl^- 浓度的季节性循环特征,因此可用于估计滞留时间分布^[38]。利用水文模型和水分运移动力学模型估算水分滞留时间时发现,地下水和浅层储存的快速流是河流中 Cl^- 浓度的主要来源,同时,浅层地下水与深层地下水之间相互作用会影响河流平均滞留时间的变化^[39]。

受土壤水文特性、径流和示踪剂(Br^-)数据约束的空间显式模型^[17],可用于评估水分滞留时间分布以及模拟陡峭山坡上的水分和溶质通量的变化过程。估算的水分滞留时间分布为地下储水量和地下水水位动态变化等提供了科学依据。

然而,由于水中的氯化物浓度会受到干沉积、蒸发浓度和生物地球化学循环的影响,水同位素可以通过蒸发进行分馏^[40],因此,保守示踪剂的变化过程只反映水的运输、储存和交换。通过采集径流过程中的水样,分析水中同位素和水化学指标,结合数学模型,深刻理解流域内水文过程和机制,可以更好地了解流域水文循环。

4 估算水分滞留时间的集总参数模型

除了应用水文示踪技术之外,概念水文模型^[41]、粒子示踪^[42]、分割模型^[43]以及随机模型^[44]等也可以用来估算滞留时间^[11]。但因多数流域缺少精确的水文地质边界条件等资料,使得上述模型的适用性受到很大限制。而集总参数模型可以只借助于天然或人工示踪剂来推求滞留时间,因此其适用性相对广泛。集总参数模型以滞留时间分布模型为基础,滞留时间分布起着传递函数的作用,并以不同的方式将流域内部功能概念化^[26]。集总参数卷积方法在一定程度上已成为量化流域水文过程响应的行业标准^[1]。

在研究集总参数模型时,通常把系统看作一个整体,只研究其输入与输出之间的拟合关系,而很少考虑系统内部过程和机理。水分滞留时间的分布就是通过构建集总参数模型得到环境示踪剂输入-输出关系的时间变化来实验确定的^[1](图1)。在降水径流过程中,环境示踪剂沿着流域不同流动路径汇

流至河道,汇流路径不同,可造成示踪剂到达河道的的时间或延迟或分布扩散,因此,这些特征也直接或间接反映了流域的水流路径分布、径流过程和地下水水文特征。滞留时间分布描述了从流域所有位置到达流域出口的示踪剂的综合响应。

从数学上讲,这个过程可以用卷积积分来表示:

$$C_{out}(t) = \int_0^{\infty} RTD(\tau) C_{in}(t - \tau) \exp(-\lambda\tau) d\tau \quad (1)$$

式中: $C_{out}(t)$ 为任意时刻的输出组成; $C_{in}(t - \tau)$ 为示踪剂的输入组成,其中 τ 为输入和输出示踪剂组成之间的滞后时间; λ 为示踪剂的一阶衰变常数(对于稳定同位素, $\lambda = 0$)。

集总参数方法仅适用于稳态条件或者径流过程中水分流动模式不随着时间显著变化的情况,尽管如此,仍有研究对其进行了完善,以允许应用于非稳定流动系统^[25,45]。滞留时间分布是表现流域时不变、空间集中特征的指标,流域水流路径分布和流动系统假设使得滞留时间分布可以呈现不同的形状。上述公式中的滞留时间分布通常由简单的响应函数组成(即1~3个参数),这些函数在概念上代表了实际系统的主要路径、存储和流动条件^[38]。

目前,已有标准的集总参数模型程序来根据环境示踪数据估计滞留时间^[46]。常用的滞留时间分布模型包括:线性模型(Linear Model, LM)、活塞流模型(Piston Flow Model, PFM)、指数流模型(Exponential Flow Model, EM)、指数活塞流模型(Combined Exponential - Piston Flow Model, EPM)、弥散模型(Dispersion Model, DM)以及线性活塞流模型(Combined Linear - Piston Flow Model, LPM)等^[11](表1)。其中,活塞流模型和指数流模型使用较多。前者不仅适用于包气带均质土层中入渗水的垂向渗透,也广泛应用于均质承压含水层中地下水的运动等,后者适用于均质潜水含水层,并且指数分布是集水系统中应用最广泛的分布^[46]。但是指数流分布被认为是对大多数流域的过度简化,因为它严格上只适用于非承压各向同性细粒含水层,而大多数流域都是高度异质性的,并表现出非线性水文行为。为了满足不同流域有各自适合的滞留时间分布,开始使用更多类型的参数分布模型,并取得了一定成功,具有两个参数的伽马分布模型具有相对较高的自由度,在不同的水流路径分布选择中具有很大的灵活性,因此伽马分布更适合于表征径流过程中水分储存和交换过程^[38]。

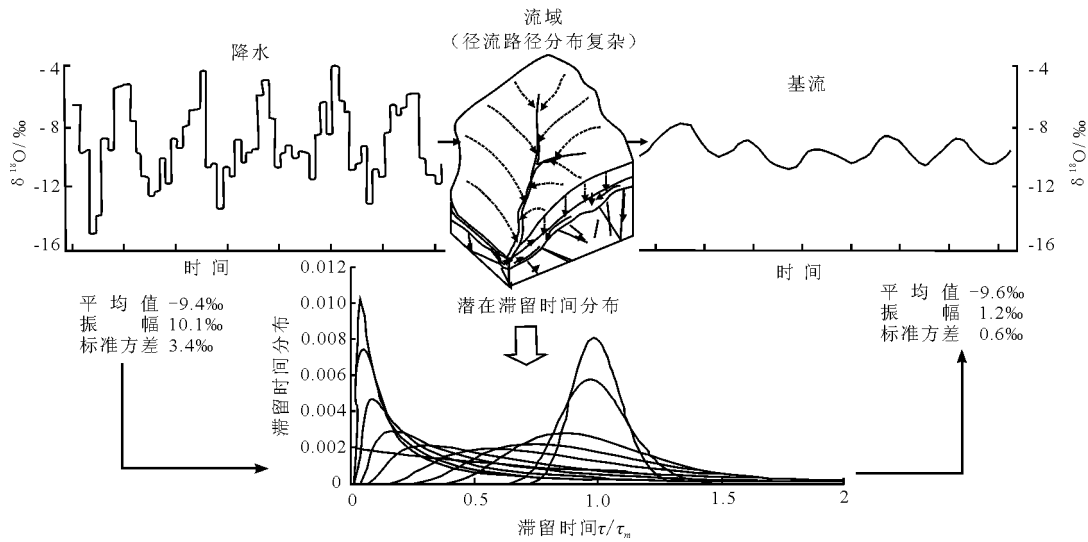


图 1 集总参数滞留时间建模方法的概念图^[1]

表 1 集总参数模型分类

模型	滞留时间分布 (RTD)	参数	平均滞留时间
指数流模型	$\tau_m^{-1} \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_m}\right)$	τ_m	τ_m
指数-活塞流模型	$\begin{cases} \left(\frac{\tau_m}{\eta}\right)^{-1} \exp\left(-\frac{\eta\tau}{\tau_m} + \eta - 1\right) & \text{for } \tau \geq \tau_m(1 - \eta^{-1}) \\ 0 & \text{for } \tau \leq \tau_m(1 - \eta^{-1}) \end{cases}$	τ_m, η	τ_m
弥散模型	$\left(\frac{4\pi D_p \tau}{\tau_m}\right)^{-1/2} \tau^{-1} \exp\left[-\left(1 - \frac{\tau}{\tau_m}\right)^2 \left(\frac{\tau_m}{4D_p \tau}\right)\right]$	τ_m, D_p	τ_m
伽马模型	$\frac{\tau^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \exp\left(-\frac{\tau}{\beta}\right)$	α, β	$\alpha\beta$

同时,有很多软件可以用来求解水分滞留时间,如 MULTIS^[47], FLOWPC^[48], TRACER^[49], LUMPED^[22]和 LUMPED unsteady^[45],这类软件主要用于解译¹⁸O、³H、⁸⁵Kr、³H-³He 等环境同位素数据。在上述软件发展过程中,尽管集成性有所增强,但是仍存在着一定的局限性,系统的复杂程度和示踪剂的多样性均对其具有主要影响。因此,在选用示踪剂和解译软件之前应做好研究区水文地质特征、土壤结构特征等调查工作,继而选用合适的示踪剂和软件进行计算,最终得到合理可信的结果。

5 结论与展望

本文在前人对径流过程水分滞留时间研究的基础上,系统总结了水分滞留时间及其影响因素,分析了同位素和水化学示踪剂在滞留时间评估中的应用,综述了估算水分滞留时间的集总参数模型的研

究进展。总结如下:

(1)水分滞留时间主要受地形、土壤覆盖以及气候等因素的影响,并与流域面积大小有一定关系。

(2)水文示踪技术在评估水分滞留时间时主要运用同位素示踪剂(主要是¹⁸O、³H或D)和水化学示踪剂(主要是Cl⁻)对模型模拟进行验证。

(3)集总参数模型在水分滞留时间研究上有多种类型, MULTIS, FLOWPC, TRACER, LUMPED 和 LUMPED unsteady 等软件可直接进行模拟并推求水分滞留时间分布,减少了资料缺乏流域对滞留时间研究所造成的困难。通过水文示踪技术和集总参数模型评估流域径流过程滞留时间的研究取得了很大的进展。

尽管国外对滞留时间研究已有了很多成果,但是研究主要集中在流域总径流和地下水径流水分滞留时间上,而且国外对流域精细化的全要素监测不

够完善;国内只有在地下水研究中才有滞留时间的概念,对其他径流组成滞留时间基本没有研究。因此,若在开展流域全要素监测的前提下,以水文示踪和集总参数模型为研究方法,推求不同径流组成水分滞留时间,结合关键带土壤结构对水分滞留时间的影响,将能更详细地揭示流域水文过程响应机制。

参考文献:

- [1] MCGUIRE K J, MCDONNELL J J. A review and evaluation of catchment transit time modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 330(3-4):543-563.
- [2] BURNS D, PLUMMER L N, MCDONNELL J J, et al. The geochemical evolution of riparian groundwater in a forested piedmont catchment[J]. *Groundwater*, 2010, 41(7):913-925.
- [3] SWANA K A, MILLER J A, TALMA A S, et al. Comparing the residence time of deep vs shallow groundwater in the Karoo Basin, South Africa using ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl and ^4He isotopes[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, 13:215-218.
- [4] MARTÍNEZ, D. E., FOURRÉ, E, LONDOÑO M Q, et al. Residence time distribution in a large unconfined - semiconfined aquifer in the Argentine Pampas using $^3\text{H}/^3\text{He}$ and CFC tracers [J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, 24(5):1107-1120.
- [5] PETERMANN E, GIBSON J J, KNÖLLER K, et al. Determination of groundwater discharge rates and water residence time of groundwater - fed lakes by stable isotopes of water (^{18}O , ^2H) and radon (^{222}Rn) mass balances[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(6):805-816.
- [6] MARÇAIS J, DE DREUZY J R, GINN T R, et al. Inferring transit time distributions from atmospheric tracer data: Assessment of the predictive capacities of Lumped Parameter Models on a 3D crystalline aquifer model[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525:619-631.
- [7] KRISZTINA KÁRMÁN, MALOSZEWSKI P, JÓZSEF DEÁK, et al. Transit time determination for a riverbank filtration system using oxygen isotope data and the lumped - parameter model[J]. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, 2014, 59(6):1109-1116.
- [8] OPHÉLIE FOVET, RUIZ L, FAUCHEUX M, et al. Using long time series of agricultural - derived nitrates for estimating catchment transit times [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 522:603-617.
- [9] WOLO D M. Effects of basin size on low - flow stream chemistry and subsurface contact time in the Neversink River watershed, New York [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 11(9):1273-1286.
- [10] BROXTON P D, TROCH P A, LYON S W. On the role of aspect to quantify water transit times in small mountainous catchments [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(8):2263-2289.
- [11] 吴锦奎,杨淇越,叶柏生,等. 同位素技术在流域水文研究中的重要进展[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(6):1024-1032.
- [12] MCGUIRE K J, MCDONNELL J J, WEILER M, et al. The role of topography on catchment - scale water residence time [J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(5):266-279.
- [13] LAUDON H, SJBLÖM V, BUFFAM I, et al. The role of catchment scale and landscape characteristics for runoff generation of boreal streams [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 344(3-4):198-209.
- [14] TETZLAFF D, MALCOLM I A, SOULSBY C. Influence of forestry, environmental change and climatic variability on the hydrology, hydrochemistry and residence times of upland catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 346(3-4):93-111.
- [15] JENCISO K G, MCGLYNN B L, GOOSEFF M N, et al. Hydrologic connectivity between landscapes and streams: transferring reach - and plot - scale understanding to the catchment scale [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(4):262-275.
- [16] AGGARWAL P K. Isotope hydrology at the International Atomic Energy Agency [J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(11):2257-2259.
- [17] SHAMAN J, STIEGLITZ M, BURNS D. Are big basins just the sum of small catchments? [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 18(16):3195-3206.
- [18] MCGLYNN B L, SEIBERT J. Distributed assessment of contributing area and riparian buffering along stream networks [J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(4):24-26.
- [19] SAYAMA T, MCDONNELL J J. A new time - space accounting scheme to predict stream water residence time and hydrograph source components at the water scale [J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7):735-742.
- [20] RODGERS P, SOULSBY C, WALDRON S, et al. Using stable isotope tracers to assess hydrological flow paths, residence times and landscape influences in a nested mesoscale catchment [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2005, 9(3):139-155.
- [21] BARIAC T, VIVILLE D, LADOCHE B. Isotope hydrological study of mean transit time in the granitic strengbach catchmen (Vosges Massif, France): Application for

- the FlowPC Model with modified input function [J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(8):1737-1751.
- [22] TAPIA A P, SOULSBY C, TETZLAFF D, et al. Hydroclimatic influences on non-stationary transit time distributions in a boreal headwater catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543:7-16.
- [23] SOLOMON D K, GENEREUX D P, PLUMMER L N, et al. Testing mixing models of old and young groundwater in a tropical lowland rain forest with environmental tracers [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(4):258-271.
- [24] INGO HEIDBÜCHEL, TROCH P A, LYON S W, et al. The master transit time distribution of variable flow systems[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(6):407-425.
- [25] OZYURT N N, BAYARI C S. Steady- and unsteady-state lumped parameter modelling of tritium and chlorofluorocarbons transport: hypothetical analyses and application to an alpine karst aquifer [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 19(17):3269-3284.
- [26] HRACHOWITZ M, SOULSBY C, TETZLAFF D, et al. Using long-term data sets to understand transit times in contrasting headwater catchments[J]. *Journal of Hydrology* 2009, 367(3-4):237-248.
- [27] LYON S W, DESILETS S L E, TROCH P A. Characterizing the response of a catchment to an extreme rainfall event using hydrometric and isotopic data [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(6):205-216.
- [28] CHATTERJEE S, SINHA U K, ANSARI M A, et al. Application of lumped parameter model to estimate mean transit time (MTT) of the thermal water using environmental tracer (^3H): Insight from uttarakhand geothermal area (India) [J]. *Applied Geochemistry*, 2018, 94:1-10.
- [29] KRALIK M, HUMER F, FANK J, et al. Using $^{18}\text{O}/^2\text{H}$, $^3\text{H}/^3\text{He}$, ^{85}Kr and CFCs to determine mean residence times and water origin in the Grazer and Leibnitzer Feld groundwater bodies (Austria) [J]. *Applied Geochemistry*, 2014, 50:150-163.
- [30] TAMBORSKI J J, COCHRAN J K, BOKUNIEWICZ H J. Application of ^{224}Ra and ^{222}Rn for evaluating seawater residence times in a tidal subterranean estuary [J]. *Marine Chemistry*, 2017, 189:32-45.
- [31] WANG Shiqin, YUAN Ruiqiang, TANG Changyuan, et al. Combination of CFCs and stable isotopes to characterize the mechanism of surface water-groundwater interaction in a headwater basin of the North China Plain [J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(11):1571-1587.
- [32] BASKARAN M, SWARZENSKI P W. Seasonal variations on the residence times and partitioning of short-lived radionuclides (^{234}Th , ^7Be and ^{210}Pb) and depositional fluxes of ^7Be and ^{210}Pb in Tampa Bay, Florida [J]. *Marine Chemistry*, 2007, 104(1-2):27-42.
- [33] HE Maojun, CAI Wenjian, NI Wei, et al. RINGA based control system configuration for multivariable processes [J]. *Journal of Process Control*, 2009, 19(6):1036-1042.
- [34] STADLER S, OSENBRÜCK KARSTEN, DUIJNISVELD W H M, et al. Linking chloride mass balance infiltration rates with chlorofluorocarbon and SF_6 , groundwater dating in semi-arid settings: potential and limitations [J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 2010, 46(3):312-324.
- [35] COOK P G, SOLOMON D K. Recent advances in dating young groundwater: chlorofluorocarbons, $\{^3\text{H}\}/\{^3\text{He}\}$ and ^{85}Kr [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 191(1-4):245-265.
- [36] FENICIA F, MCDONNELL J J, SAVENIJE H H G. Learning from model improvement: On the contribution of complementary data to process understanding [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(6):196-200.
- [37] NEAL C, CHRISTOPHERSEN N, NEALE R, et al. Chloride in precipitation and streamwater for the upland catchment of river severn, mid-wales; some consequences for hydrochemical models [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 2(2):155-165.
- [38] KIRCHNER J W, FENG X H, NEAL C. Fractal stream chemistry and its implications for contaminant transport in catchments [J]. *Nature*, 2000, 403(6769):524-527.
- [39] CYRILLE B. Modeling chloride transport using travel time distributions at Plynlimon, Wales [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(5):3259-3276.
- [40] KIRCHNER J W, TETZLAFF D, SOULSBY C. Comparing chloride and water isotopes as hydrological tracers in two Scottish catchments [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(12):1631-1645.
- [41] RINALDO A, BEVEN K J, BERTUZZO E, et al. Catchment travel time distributions and water flow in soils [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(7):209-216.
- [42] EBERTS S M, BÖHLKE J K, KAUFFMAN L J, et al. Comparison of particle-tracking and lumped-parameter age-distribution models for evaluating vulnerability of production wells to contamination [J]. *Hydrogeology Journal*, 2012, 20(2):263-282.

- ronmental Modelling & Software, 2017, 95 :132 – 142.
- [15] 李春林, 刘 淼, 胡远满, 等. 基于暴雨径流管理模型 (SWMM) 的海绵城市低影响开发措施控制效果模拟 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(8) :2405 – 2412.
- [16] TREDWAY J C, HAVLICK D G. Assessing the potential of low-impact development techniques on runoff and streamflow in the Templeton Gap Watershed, Colorado [J]. The Professional Geographer, 2016, 69(3) :372 – 382.
- [17] U. S. Environmental Protection Agency. SUSTAIN – programmer's manual: simulation engine [Z]. 2012.
- [18] WU J Y, THOMPSON J R, KOLKA R K, et al. Using the storm water management model to predict urban headwater stream hydrological response to climate and land cover change [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(12) :4743 – 4758.
- [19] CARTER T, JACKSON C R. Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. Landscape and urban planning, 2007, 80(1 – 2) :84 – 94.
- [20] 邵 明, 李 雄, 戈晓宇, 等. 海绵城市视角下 SUSTAIN 模型在城市绿地设计中的应用 [J]. 工业建筑. 2017, 47(5) :56 – 61.
- [21] 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 等. 绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 [J]. 环境科学, 2019(4) :1803 – 1810.
- [22] HUANG C L, HSU N S, LIU H J, et al. Optimization of low impact development layout designs for megacity flood mitigation [J]. Journal of hydrology, 2018, 564 :542 – 558.
- [23] 王晓莹, 杨 丹, 邵银龙. 南京市近 60 年气候变化特征分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4) :119 – 124.
- [24] WONG G K L, JIM C Y. Quantitative hydrologic performance of extensive green roof under humid-tropical rainfall regime [J]. Ecological Engineering, 2014, 70 :366 – 378.
- [25] 杨天翔. 基于 SUSTAIN 模型的海绵城市最佳管理实践探究——以盐城市中心排水片区为例 [C] // 持续发展理性规划——2017 中国城市规划年会论文集, 2017.
- [26] U S Environmental Protection Agency. BMP siting tool: step – by – step guide [Z]. 2013.
- [27] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法 [J]. 给水排水, 2009, 45(11) :213 – 217.
- [28] 中华人民共和国建设部. 室外排水设计规范: GB50014 – 2006 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [29] 徐慧珺. 基于 SWMM 模型的南京典型区雨洪模拟研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
- [30] 李 研. 基于 SUSTAIN 与 SWC 的城市雨水 LID 设施评价方法研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2015.
- [31] 车 伍, 李俊奇. 城市雨水利用技术与管理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [32] ERDOGMUS H, FAVARO J, STRIGEL W. Return on investment [J]. IEEE Software, 2004, 21(3) :18 – 22.

(上接第 29 页)

- [43] BIEBLER K E, WODNY M. Compartment models and associated residence time distributions [M]. Splines and Compartment Models: An Introduction. 2014.
- [44] MELANSON A, MEJIAS J F, JUN J J, et al. Nonstationary stochastic dynamics underlie spontaneous transitions between active and inactive behavioral states [J]. Eneuro, 2017, 4(2) :167 – 187.
- [45] OZYURT N N, BAYARI C S. LUMPED Unsteady: a Visual Basic code of unsteady – state lumped – parameter models for mean residence time analyses of groundwater systems [J]. Computers & Geosciences, 2005, 31(3) :329 – 341.
- [46] 李 婷, 胡伟伟, 马致远, 等. 基于活塞—指数混合模型的地下水可更新性研究 [J]. 地下水, 2011, 33(3) :1 – 2 + 10.
- [47] TOTH D J, KATZ B G. Mixing of shallow and deep groundwater as indicated by the chemistry and age of karstic springs [J]. Hydrogeology Journal, 2006, 14(6) :1060 – 1080.
- [48] SÁNCHEZ – MURILLO R, BROOKS E S, ELLIOT W J, et al. Isotope hydrology and baseflow geochemistry in natural and human-altered watersheds in the Inland Pacific Northwest, USA [J]. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2015, 51(2) :231 – 254.
- [49] JURGENS BC, BÖHLKE JK, EBERTS SM. TracerLPM (Version 1): An Excel [®] workbook for interpreting groundwater age distributions from environmental tracer data [M]. Createspace Independent Pub, 2014.